

Construcción de un generador de Van de Graaff de 200kV_{cd}

EDUARDO MARLÉS SÁENZ*

ROLANDO ÁVILA PATIÑO**



Foto: Van de Graaf. laboratorio alta tensión U.V.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de la construcción de un generador de Van de Graaff de 200kV_{cd}, realizado en el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle. La generación de los voltajes en corriente directa fue establecida de acuerdo con la norma IEEE Std 4-1995, teniendo en cuenta las distancias de separación entre esferas. Los resultados obtenidos fueron verificados mediante la simulación en elementos finitos, con el programa ELCUT-3.40, estimando las intensidades de campo eléctrico entre esferas. La polaridad de la carga eléctrica generada fue determinada mediante el registro de la señal de corriente de descarga a tierra.

Palabras clave: Generador Van de Graaff, alta tensión, corriente directa, carga eléctrica, elementos finitos.

* Ingeniero Electricista., M.Sc. en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica. Profesor Universidad del Valle - GRALTA. edmarles@univalle.edu.co

** Ingeniero Electricista. Universidad del Valle, 2005.

Fecha de recepción: Enero 12 de 2006, Fecha de aprobación: Marzo 17 de 2006.

Abstract

In this paper the obtained results of the construction of a Van de Graaff generator of 200kVdc, made in the laboratory of high voltage of the Universidad del Valle. The generation of the direct current voltages was established according to the standard IEEE Std. 4-1995, considering the separation distances between spheres. The obtained results were verified by means of the simulation in finite element, with program ELCUT-3.40, considering the electric field intensities between spheres. The polarity of the generated electric charge was determined by means of the current signal registry of the discharge to ground.

Key words: Van de Graaff generator, high voltage, direct current, electrical charge, finite elements

I. Introducción

Robert Jemison Van de Graaff, se destacó en el campo de la física por los aportes de sus investigaciones; su desarrollo más notable fue el generador electroestático de alto voltaje, que hoy en día lleva el nombre de Generador de Van de Graaff.¹ Este aparato puede generar hasta 20 millones de voltios de corriente directa, y ha sido usado desde hace varias décadas hasta la actualidad.²⁻⁵ Entre las diversas aplicaciones que tiene en el campo de la física nuclear están: el uso del generador como fuente radiante y acelerador de partículas (protones y electrones) y entre las aplicaciones en ingeniería eléctrica se puede mencionar el uso de fuentes de alta tensión de corriente directa en los ensayos orientados a determinar o verificar la capacidad de soporte al esfuerzo eléctrico que tienen los

materiales aislantes, siendo ésta una de las características más importantes en el diseño de los equipos para alta tensión; a nivel académico para demostraciones de algunos fenómenos electrostáticos y de fuentes de generación de alta tensión en voltajes de corriente directa.

Con la intención de conocer mucho más a cerca de este aparato y de tener una herramienta práctica para la investigación de algunos fenómenos electrostáticos en alta tensión, se construyó un generador de Van de Graaff en el laboratorio de alta tensión de la Universidad del Valle.⁶ Inicialmente se verificaron las características físicas y eléctricas de los elementos constructivos como son la capacidad de soportar sobrevoltajes de corriente alterna e impulso. Con el generador construido y funcionando, se pudo experimentar la presencia de voltajes de ruptura mediante el uso de un electrodo a tierra (centellador). Luego se registraron algunas señales de corriente de descarga a tierra. Las validaciones se realizaron utilizando valores dados por la norma⁷ y se compararon con los resultados obtenidos por simulación utilizando el programa ELCUT 3.40 basado en la teoría de elemento finito.

caron las características físicas y eléctricas de los elementos constructivos como son la capacidad de soportar sobrevoltajes de corriente alterna e impulso. Con el generador construido y funcionando, se pudo experimentar la presencia de voltajes de ruptura mediante el uso de un electrodo a tierra (centellador). Luego se registraron algunas señales de corriente de descarga a tierra. Las validaciones se realizaron utilizando valores dados por la norma⁷ y se compararon con los resultados obtenidos por simulación utilizando el programa ELCUT 3.40 basado en la teoría de elemento finito.

II. Ecuaciones teóricas

A. Definición de las variables

δ . = Factor relativo de densidad

V_{cd} = Voltaje de corriente directa

R = Radio de la esfera (domo)

C = Capacitancia equivalente

V_{max} = Voltaje máximo teórico logrado, respecto a tierra

U_{max} = Energía almacenada máxima

E_{max} = Intensidad de Campo Eléctrico promedio para el cual el aire conduce

Q_{max} = Carga máxima

P_{max} = Potencia máxima a la cual se transfiere la energía eléctrica

V_{max} = Voltaje máximo teórico logrado, con respecto a tierra

E_{max} = Intensidad de campo eléctrico para el cual el aire conduce

I_{max} = Corriente máxima de salida

n = Velocidad en revoluciones por minuto

v = Velocidad en metros por segundo

d (m) = Diámetro de la polea

L (m) = Ancho efectivo de la correa

ϵ_0 = 8.854×10^{-12} F/m. Permitividad del espacio libre.

$VN-ext$ = El mismo valor del voltaje de norma, corregido a condiciones atmosféricas de ensayo.

Kd = Factor de corrección atmosférica por densidad.

B. Formulaciones teóricas

La capacitancia de una esfera conductora, cargada y flotante en el aire, está dada con una buena aproximación por

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot R = \frac{Q_{max}}{V_{max}} \quad (1)$$

El potencial máximo de la esfera respecto a tierra es

$$V_{max} = E_{max} \cdot R \quad (2)$$

La energía almacenada en el terminal de un generador de Van de Graaff puede ser calculada como

$$U_{max} = 0,5 \cdot C \cdot V_{max}^2 \quad (3)$$

La potencia mecánica requerida para mover la polea cargada eléctricamente y vencer los rozamientos debe ser mayor o igual a

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \\ = \epsilon_0 \cdot E_{max}^2 \cdot R \cdot L \cdot d \cdot \pi \quad (4)$$

donde se estimó que la corriente promedio de carga por segundo hacia la esfera es de

$$I_{max} = \epsilon_0 \cdot E_{max} \cdot L \cdot v \quad (5)$$

C. Ecuaciones recurrentes

Las características del generador son calculadas a partir de las ecuaciones recurrentes, obtenidas de las ecuaciones teóricas.

• Energía y potencial máximo

Dada la máxima energía requerida (U_{max}) se obtiene el voltaje máximo teórico V_{max} y viceversa mediante la expresión

$$V_{max} = \sqrt[3]{\frac{U_{max} \cdot E_{max}}{\pi \cdot \epsilon_0}}$$

Como el generador construido es para un fin académico, por seguridad de las personas, se estima almacenar $U_{max}=1.34J$ como la energía máxima en la superficie

esférica, (para generadores pequeños se recomienda $U_{max} \leq 10J$ por seguridad del personal) y si se considera una intensidad de campo eléctrico promedio $E_{max} = 3 \text{ kV/mm}$ para que ocurra descarga disruptiva en el aire a condiciones estándar, se obtiene un valor de $V_{max}=525kV$.

• Diámetro del domo (Diámetro de la esfera)

La ecuación recurrente para la selección del domo es

$$R = \frac{V_{max}}{E_{max}} \quad (7)$$

Utilizando el resultado de (6) el valor del radio del domo es. La carga máxima acumulada ahora puede ser estimada usando (1), (2) y (7).

Se recomienda construir generadores de Van de Graaff, con esferas de diámetro igual a: 6,25cm, 12,5cm, 25cm, 50cm y 75cm, porque estos valores de diámetro se encuentran normalizados en la Std. 4-1995, y por lo tanto facilita la determinación del potencial en la esfera con respecto a tierra de acuerdo a la metodología que se usó en este trabajo.

• Potencia mecánica requerida

De acuerdo a (4), la ecuación recurrente para determinar la potencia mecánica del motor se obtiene con

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \\ = \epsilon_0 \cdot E_{max}^2 \left(\frac{n}{60} \right) \cdot R \cdot L \cdot d \cdot \pi$$

De donde se estima que la corriente promedio de carga por segundo hacia la esfera es de

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{max}} \quad (8)$$

Es decir, conocidas y elegidas las variables de entrada: V_{max} ,

E_{\max} , L , d y n , se puede calcular P_{\max} e I_{\max} y se calcula la potencia mecánica mínima necesaria del motor para lograr una energía U_{\max} , a un voltaje V_{\max} .

Si se sustituyen los valores $d = 3,81\text{cm}$, $L = 4,5\text{cm}$, $n=7500\text{rpm}$ y los resultados de (6) y (7) en (4) y (8) respectivamente, se obtiene que $P_{\max}=9.39\text{W}$ y $I_{\max}=17\mu\text{A}$. Con estas características se pueden comprar motores hasta de $\frac{1}{2}$ HP como motores de máquinas de coser, motores de ventiladores domésticos y motores de licuadoras.

Para tener mejor estabilidad mecánica se sugiere que $L \leq d$, y que la banda no sea de un espesor mayor a 3mm.

D. Componentes físicas del generador

Además del domo (esfera) y del motor, es necesario saber qué tipo de materiales son los más adecuados para la correa, los rodillos, el domo, la columna de apoyo y las escobillas, porque ellos constituyen el corazón de un generador de Van de Graaff auto-excitado, donde se aplica el efecto triboeléctrico.⁶

La magnitud y polaridad de la carga generada dependen del grado de separación en la serie triboeléctrica, del tiempo de contacto entre los materiales y de la velocidad de separación de los mismos, desde luego todo ello modificado por el grado de humedad. (Ver Figura 1).

- **Domo:** Es la esfera conductora que almacenará la carga. Se compra o se requiere para su fabricación con el radio R calculado y de material de aluminio de $1\text{ mm} < \text{grosor} < 1.5\text{ mm}$, de constitución esférica hueca, formada por dos hemisferios para mayor facilidad del montaje, y por razones de mantenimiento de la posición de la escobilla superior y secado de humedad. (Ver Figura 2).

MATERIALES	POLARIDAD ADQUIRIDA
Aire seco	
Vidrio	
Mica	
Cabello humano	
Nylon	Tendencia a la Polaridad positiva
Lana	
Piel	
Plomo	
Aluminio	
Papel	
Algodón	
Acero	
Madera	Tendencia a la Polaridad negativa
Ámbar	
Lacre	
Caucho duro	
Cobre, Níquel	
Latón, Plata	
Oro, Platino	
Azufre	
Rayón de acetato	
Poliéster	
Celuloide	
Orlon	

Figura 1. Serie triboeléctrica

- **Motor:** Mediante un acople plástico transmite el movimiento a la polea inferior. (Ver Figura 3). El motor que se utilizó en la construcción del generador, es un motor de máquina de costura, el cual tiene los siguientes datos nominales: 0,12 HP, 1 A, 7500rpm, 110 V, 60 Hz.

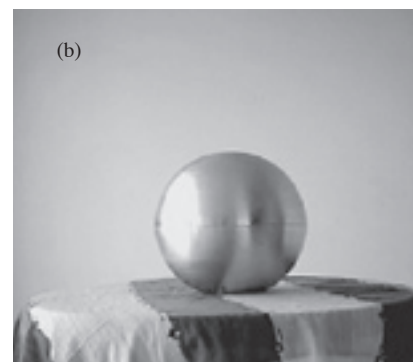
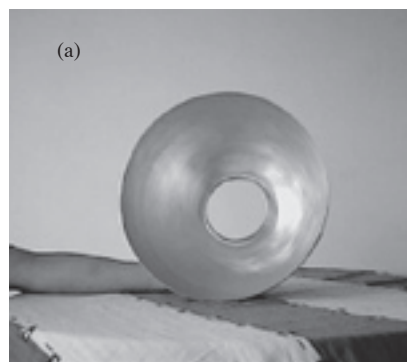


Figura 2. (a) Hemisferio inferior del domo colector. (b) Domo colector del generador.

- **Rodillos:** El material constitutivo se selecciona de acuerdo a la serie triboeléctrica, y su geometría favorecerá el comportamiento con la correa, de tal manera que ésta permanezca centrada en el mismo. (Ver Figura 4).

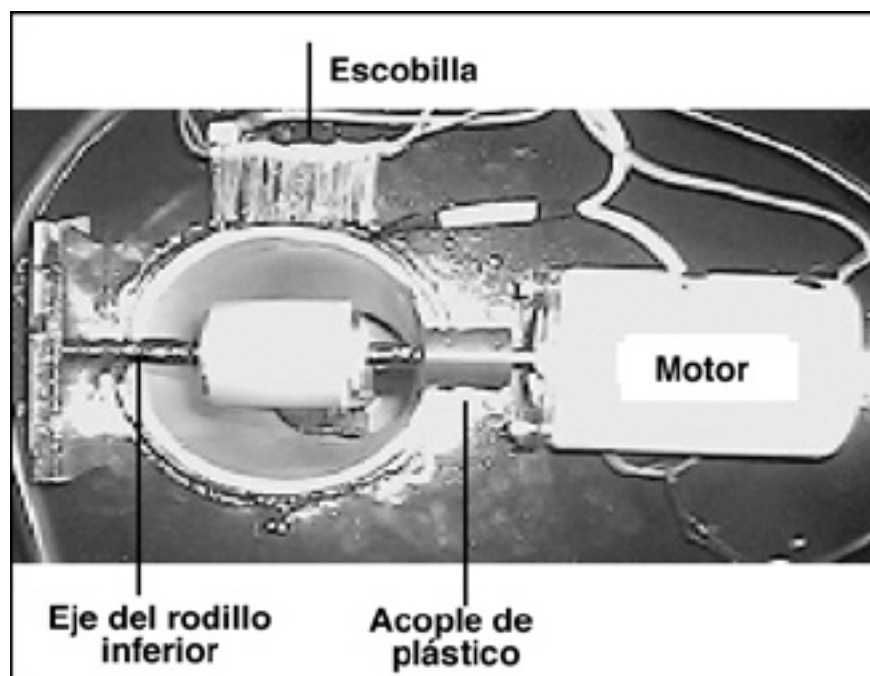
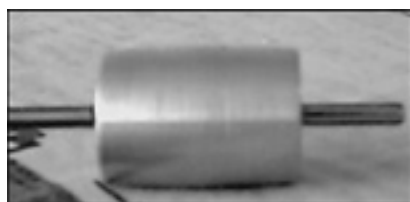


Figura 3. Posición del motor acoplado con el eje del rodillo inferior



(a)



(b)

Figura 4. (a) Rodillo de aluminio. (b) Rodillo de teflón.

- **Banda o correa:** Su material se selecciona de acuerdo con la serie triboeléctrica donde se establece la tendencia de la polaridad de carga. (Ver Figura 2), y de acuerdo con el material de los rodillos. Una regla básica es que la correa acabada (los extremos ya pegados) debe tener una longitud entre $2/3$ y $3/4$ de la distancia entre los centros

de los rodillos puestos en sus respectivos sitios.

La transferencia de carga entre el área efectiva de contacto de la banda de caucho neopreno gris y la superficie del rodillo de aluminio es máxima justo cuando el generador arranca, ya que el torque de arranque del generador es grande y es allí donde hay mayor fricción entre los materiales. Por lo tanto, la magnitud del impulso de corriente es alta.

El potencial eléctrico de la banda es otro factor a tener en cuenta si se mira detenidamente el máximo pico de corriente. A mayor potencial, mayor será la presión de contacto entre los dos materiales.

El tiempo de contacto entre la banda de neopreno y el rodillo de aluminio también juega un papel básico en la magnitud de la carga acumulada con el generador, pues a mayor tiempo de contacto entre los materiales, mayor es la transferencia de carga de un material al otro.

- **Tubo de PVC:** Es la columna de apoyo del domo, se prefiere de un material económico y de alta capacidad de aislamiento eléctrico ante un alto V_{cd}, en el ensamble debe quedar penetrando la esfera en no más de 5 cm. (Ver Figura 5).



Figura 5. Ranuras y orificios en el extremo superior del tubo de PVC.

- **Escobillas:** Para las escobillas, preferiblemente elegir un material que sea buen conductor y económico. Se recomienda cobre. No olvidar que debe tener la mayor cantidad de puntas posibles. (Ver Figura 6).

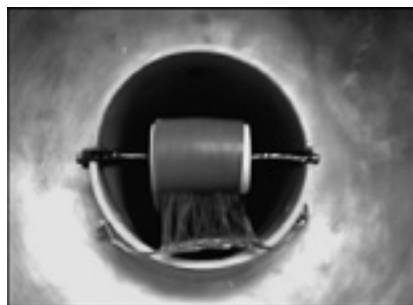
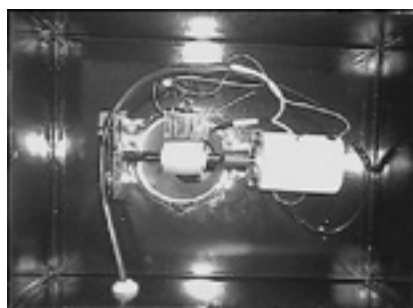
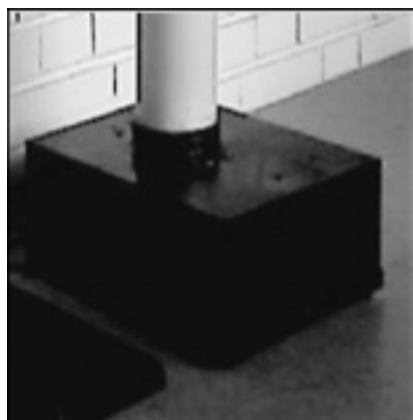


Figura 6. Escobilla en la parte superior del tubo de PVC.

- **Caja soporte:** Es de material de lámina galvanizada, con huecos para sujeción de accesorios (Ver Figura 7).



(a)



(b)

Figura 7. (a) Vista desde el plano inferior. (b) vista exterior.

- **Centellador:** Debe estar conectado a tierra y es el elemento necesario para provocar la descarga. Debe tener el mismo radio y material del domo, lo que permite estimar el voltaje de ruptura en condiciones estándar para cada distancia de descarga, de acuerdo con la norma,⁷ (Ver Figura 8).



Figura 8. Centellador para descargar el generador de Van de Graaff.

III. Análisis experimental

A. Voltajes de ruptura e intensidad de campo eléctrico

Para hacer una estimación de los valores de voltajes de ruptura máximos y de intensidad de campo eléctrico promedio, alcanzados con el generador entre esferas, al ubicar el domo del centellador frente al domo del generador a las distancias de: 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm.

Se anotaron, para cada separación, los valores de condiciones atmosféricas en todos los casos en los que ocurrió la descarga al centellador. Debido a la ausencia de un medidor de alta tensión de V_{cd} (comprarlo incrementa los costos), se usó un método indirecto para estimar los voltajes de ruptura.

La norma IEEE Std. 4–1995⁷ establece los voltajes de ruptura para una configuración de electrodos esfera-aire-esfera aterrizada, como función de la distancia de separación entre esferas y su diámetro (6.25cm, 12.5cm, 25cm, 50cm y 75cm), los valores de voltaje de ruptura son presentados en la norma en condiciones atmosféricas estándar ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 101,3 \text{ kPa}$ (1013 mB), $h = 11\text{g/m}^3$). Es decir, dada una distancia de separación entre esferas y conocido el radio de las mismas, la norma establece el valor pico del voltaje de ruptura. Para obtener el valor de voltaje pico de ruptura a condiciones atmosféricas en las que ocurrió la descarga en el generador, se debe corregir por densidad, tal como se indica en la norma para la configuración esfera-aire-esfera. El método indirecto aplicado sólo es válido para configuraciones de electrodos esfera-aire-esfera, con esferas que tengan valores de diámetros normalizados (indicados más arriba) y distancias geométricas en las proporciones establecidas por la norma, caso en el cual el voltaje pico de ruptura del generador a tierra está dado directamente en la estándar IEEE Std. 4–1995. Para el generador construido, se estimaron los voltajes de ruptura usando la extrapolación (VN-ext) de los valores normalizados debido a que en la etapa de diseño no se aplicó un diámetro normalizado para la esfera (domo del generador de Van de Graaff) siendo el diámetro del generador que se construyó de $2R=35\text{cm}$.

Los máximos voltajes de ruptura obtenidos en condiciones atmosféricas en las que ocurrió la descarga disruptiva (condiciones atmosféricas de ensayo) se presentan en la Tabla 1.

Debido a que los valores de δ hallados con las condiciones atmosféricas a las que ocurrieron las diferentes descargas, no necesariamente coinciden con los valores presentados por la norma, K_d se estimó mediante regresión polinómica extrapolando los datos⁶ mediante el uso de (10). Con el factor de corrección atmosférica K_d así hallado se pudieron estimar los voltajes de ruptura para cada descarga presentada en el generador de Van de Graaff.

$$K_d = -8,1585 * \delta^4 + 29,984 * \delta^3 - 41,011 * \delta^2 + 25,654 * \delta - 5,4684$$

$$R^2 = 0.9998$$
(8)

De la Tabla 1 se puede observar que el mayor voltaje de ruptura obtenido, según la extrapolación de los datos de la norma, fue de 231.6kV para una distancia de separación entre esferas de 80mm, correspondiente a 208.4kV en condiciones atmosféricas en las que ocurrió la descarga. Por lo tanto se cumple lo estimado con el diseño.

Tabla 1. Voltajes de ruptura estimados para el generador de Van de Graaff construido

Separación	Voltaje de norma obtenido por extrapolación	Intensidad de campo eléctrico en condiciones atmosféricas estándar	Condiciones Atmosféricas			Densidad relativa	Factor extrapolado	Voltajes de norma referidos a condiciones atmosféricas de la descarga
d[mm]	V _{N-ext} [kV]	[kV/mm]	T[°C]	h[%]	P[mB]		K _d	V _{cd} [KV]
20	60,8	3,04	26,5	64	929	0,897	0,904	54,99
30	88,32	2,94	27,5	58	927	0,892	0,9	79,48
40	117,62	2,94	27,5	58	927	0,892	0,9	105,85
50	146,61	2,93	27,5	57	927	0,892	0,9	131,94
60	174,4	2,91	27,5	58	927	0,892	0,9	156,95
70	202,4	2,91	27,5	58	927	0,892	0,9	182,15
80	231,6	2,895	27	58	927	0,893	0,9	208,44

B. Simulación del generador de Van de Graaff con centellador

Mediante simulación con elemento finito se determinó la distribución de las líneas equipotenciales y los vectores de intensidad de campo eléctrico, encontrándose que el valor de intensidad de campo eléctrico promedio entre esferas es de 2.854kV/mm, lo cual justifica la presencia descargas entre el generador y tierra cuando al menos 231.6kVcd son generados.

La Figura 9 presenta la situación en donde la frontera más externa que rodea al generador de Van de Graaff es de 0V, sin densidad de carga. La escala es 23.16kV entre equipotenciales. El domo del generador está a 231.6kV respecto a la frontera más externa. La Figura 10 corresponde al resultado de la simulación del generador cargado y con las mismas condiciones de frontera usadas en el caso de la Figura 9, excepto que el domo está a -231.6kV, lo cual es equivalente a tener acumulada carga electrostática negativa. Los resultados para otras distancias de separación entre esferas se presentan en la Tabla 2.

C. Determinación de la polaridad de la carga generada

Para determinar la polaridad de la carga generada se registró en un

osciloscopio la onda de corriente de descarga a tierra. La señal de corriente es una proporción del voltaje sobre una resistencia de 17,24mΩ conectada en serie con el hilo conductor a tierra.

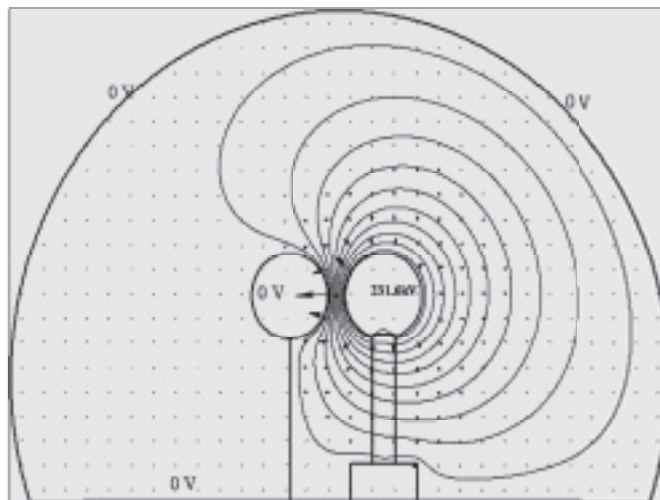


Figura 9. Distribución de las líneas equipotenciales y vectores de intensidad de campo eléctrico cuando el generador de Van de Graaff está cargado positivamente (231.6kV).

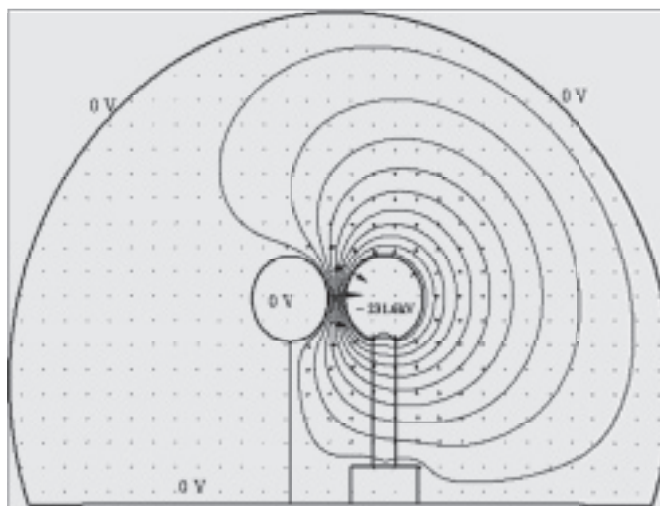


Figura 10. Distribución de las líneas equipotenciales y vectores de intensidad de campo eléctrico cuando el generador de Van de Graaff está cargado negativamente (-231.6kV).

Tabla 2. Datos obtenidos con las simulaciones con elemento finito.

Separación entre esferas [mm]	Voltaje Aplicado V [kV]	E _{max} [kV /mm]	
		valor máximo encontrado	valor entre esferas
20	60,8	3,12	3,067
30	88,32	3,19	2,854
40	117,62	2,96	2,830
50	146,61	2,98	2,834
60	174,41	2,93	2,830
70	202,4	3,01	2,795
80	231.6	3.13	2.854

En la Tabla 3 se presentan las distancias y las condiciones atmosféricas en las que se obtuvieron la descarga y el registro de la onda de corriente de descarga. Las ondas registradas son de la forma como se muestra en la Figura 11.

Tabla 3. Condiciones atmosféricas para el impulso de corriente

Separación D[mm]	Condiciones atmosféricas		
	T [°C]	h[%]	P[mB]
50	27,5	60	927
60	27,5	59	927
70	27	58	927
80	27	58	927

De todas las figuras registradas en el osciloscopio, para las distancias de separación indicadas en la Tabla 3, se encontró que el primer pico de corriente ocurre antes de 0.1μs aproximadamente, y que está en la dirección del eje “negativo de la corriente” con lo cual se determina que la polaridad de la carga eléctrica inicial del generador para este caso es negativa.

El mismo experimento puede ser usado para la determinación de la polaridad de la carga en el caso de disponer de generador para acumular carga positiva.

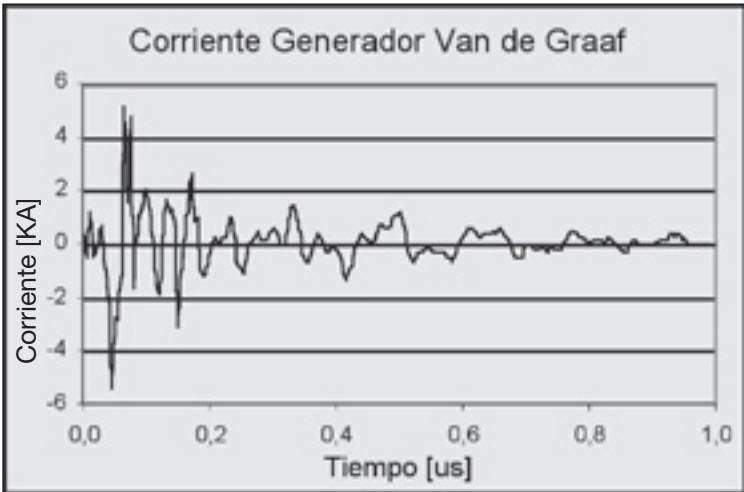


Figura 11. Onda de corriente para una distancia de 50mm.

IV. Agradecimientos

Al Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad del Valle por todos los aportes en recursos físicos y logísticos para la construcción del generador de Van de Graaff. Al ingeniero John Candelo Becerra por sus valiosas observaciones en la construcción de este documento.

V. Conclusiones y recomendaciones

La magnitud de la carga eléctrica generada está definida por el orden en la serie triboeléctrica de los materiales seleccionados para la banda transportadora de carga, el rodillo inferior y el tiempo de acumulación de carga. La polaridad de la carga eléctrica almacenada en el generador de Van de Graaff implementado se define por la posición de los rodillos, por ejemplo, el generador se carga negativamente cuando el rodillo de aluminio se encuentra en la base del generador y el rodillo de teflón se halla en la parte superior, y se carga positivamente si se intercambia la posición de los rodillos.

Se experimentó una baja eficiencia (mayor pérdida de carga eléctrica generada) cuando el nivel de humedad relativa del medio ambiente está por encima del 64 %. Para valores atmosféricos con humedades relativas superiores al 64 % la ocurrencia de las descargas se ve limitada a un pequeño rango de separación, 2cm< d< 3cm. y su ocurrencia es aleatoria.

Se pudo apreciar que la cantidad y forma de las puntas de las escobillas y la separación de las mismas a la banda transportadora juegan un papel fundamental para la adecuada ionización y posterior carga del generador de Van de Graaff, siendo las más adecuadas las formadas por hilos de alambre conductor. En ningún caso las escobillas deben tocar la superficie de la correa.

Mediante simulación se pudo determinar que en la base de la esfera del generador de Van de Graaff se presentan valores internos de campo eléctrico.

La esfera conductora del generador debe poseer en lo posible una curvatura uniforme y de diámetro estandarizado bajo la norma IEEE Std. 4-1995,⁷ con una textura en la superficie lo mas lisa posible, principalmente en la cara hacia el centellador. El diámetro normalizado permite estimar los voltajes de ruptura directamente de las tablas de la norma.

Antes de poner en funcionamiento el generador de Van de Graaff es imperativo sacar la humedad interna del tubo de PVC y la esfera del generador con un aparato secador (un secador de cabello).

Después de cada carga sin disrupción, no olvide descargar el generador de Van de Graaff (poner a tierra con el centellador) para prevenir posibles descargas a través del personal. ⚙

VI. Referencias

1. Furfari, F.A. A history of the Van de Graaff generator. En: IEEE, Industry Applications Magazine, Jan-Feb 2005, Vol. 11. Issue 1. p. 10 – 14.
2. Wolff, M.F. Van de Graaff's generator. En: IEEE, Spectrum, July 1990, Vol. 27. Issue 7. p.46.
3. King, W.J. y Solomon, S.J. PN Junctions and solar cells by ion implantation. En: IEEE International Electron Devices Meeting. Vol. 7, p.66, 1961.
4. Den Boggende, A.J.F. y DE Vries, C.P. Degradation of back-illuminated CCD's due to low energy protons. En: IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 4-10 Nov. 2001, Vol. 2, p. 876 – 878.
5. Swanekamp, S.B. et al. Measurement of 2-5 MV pulsed-voltages in electron beam diodes from Compton generated electrons. The 29th IEEE International Conference on Plasma Science, 26-30 May. 2002, p.324.
6. Ávila, P. Rolando. Construcción de un generador de van de graaff. Tesis de Grado. Director Ing. Eduardo. Marlés, MSc. Universidad del Valle. 2005.
7. IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing. New York. IEEE, 1995. 129p.: il (IEEE Std. 4-1995, revision of IEEE Std 4-1978).